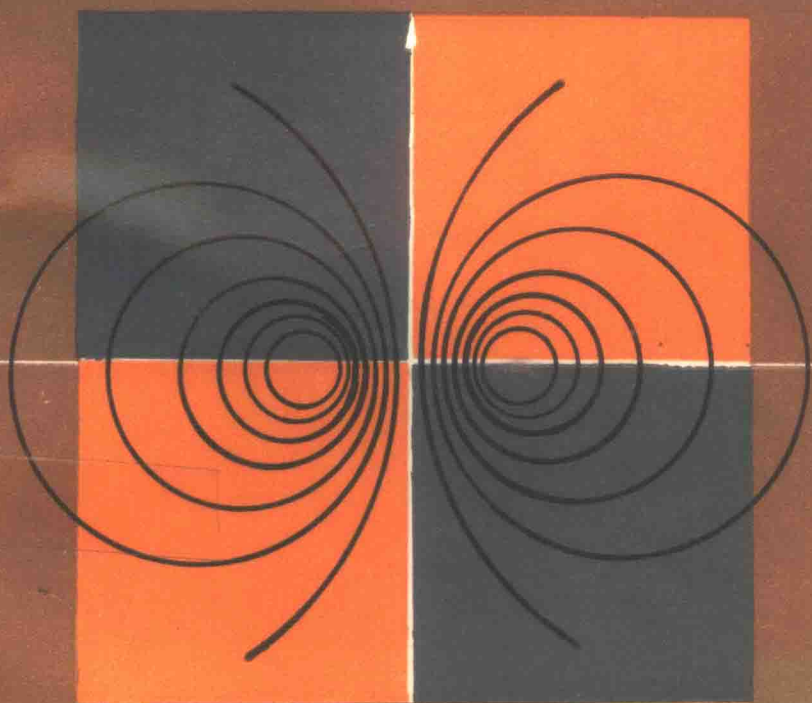


高等学校教材

电磁场基本教程

(第二版)

周省三 编



高等教育出版社

高等学校教材

电磁场基本教程

(第二版)

周省三 编

高等教育出版社

(京) 112 号

内 容 简 介

本书再版保留了原书少而精的特点,内容符合国家教育委员会 1994 年组织修订的高等学校工科《电磁场课程教学基本要求》。经国家教委电磁场课程教学指导小组审查通过,可作为本科电类各专业少学时电磁场基本教材使用。

全书共 4 章,包括静电场、恒定电场、恒定磁场和时变电磁场。考虑到不同专业的需要,将传输线内容列入附录供选用。每章配有小结、习题,书末附有习题答案。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场基本教程/周省三编。—2版。—北京:高等教育出版社,1996

{SBN 7-04-005401-9

I. 电… II. 周… III. 电磁场-高等学校-教材 IV. 044
1. 4-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 06061 号

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行

中国科学院印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 8.25 字数 210 000

1985年10月第1版 1995年10月第2版 1995年10月第1次印刷

印数 0001—1 412

定价 7.25 元

第二版前言

本次再版注意保留了原书少而精、与教学基本要求结合较紧的特点,根据国家教育委员会组织修订的高等学校工科《电磁场课程教学基本要求》,同时考虑到使用原书的部分高等学校的意见,对教材内容做了下列更动:

一、压缩了复习物理的内容,避免不必要的重复。

二、章次作了某些调整,将原第四章并入第一章,原五、六两章合为一章,以突出“场”的概念,并和教学基本要求更加一致。

三、各章系统安排尽量一致,便于学习中对比掌握。

四、某些内容加“*”号,以适应不同专业的需要,可以灵活取舍。

考虑到不同专业的不同教学需要,现对学时分配提出如下意见,供参考(见附表)。

本书由盛剑霓教授主审。本书修订大纲曾经国家教委电磁场课程教学领导小组扩大会议讨论通过,修订稿吸收了会议提出的不少宝贵意见。编者谨对他们致以深切谢意。对于书中存在的不当之处,仍希读者继续予以批评指正。

编 者

1994年6月

附表: 学时分配参考意见:

总学时	第一章	第二章	第三章	第四章	附 3	实验	练习	机动
70	20	4	14	14	8	6	2	2
60	20	4	14	14	0	4	2	2
50	16	2	12	12	0	4	2	2
40	14	2	10	10	0	4	0	0

第一版前言

本书系根据 1980 年 6 月教育部高等学校工科电工教材编审委员会审订的高等工业学校四年制电类(不包括无线电技术类)专业《电磁场理论教学大纲(草案)》编写的,经 1983 年 11 月教育部高等学校工科电工教材编审委员会电磁场理论编审小组审查通过,同意作为电类专业的基本教材试用。

全书共分六章,分别阐述了静电场、恒定电荷的电场和电流场、恒定磁场、边值问题的求解、时变电磁场、平面电磁波等内容。在编写中吸取了已有电磁场教材使用中的经验,也注意到某些不足,力求做到少而精,突出基本内容。对于教学大纲中不作要求的,一般不予编入。考虑到不同专业的需要,在附录中编入了关于复变函数法和传输线的内容,供选用。少量加深拓宽内容前加*号,供选读。本书可供 60~70 学时左右的课程使用,如删掉位场计算以及时变电磁场和平面电磁波的某些内容,也可供 40~50 学时左右的课程使用。

本书承简柏敦、盛剑霓同志审阅。他们对书稿提出了很多宝贵意见,在此谨向他们致以衷心的感谢。在编写中曾得到武汉工学院电工教研室同志们的支持和帮助,胡焕章、王天珍同志校阅了本书初稿,胡桂仙同志协助描绘了本书的插图,在此一并表示谢意。

由于本人水平有限,书中难免存在错误和不当之处,敬希读者批评指正。

周省三

1984 年 12 月于武汉工学院

目 录

引言.....	1
第一章 静电场	3
§ 1-1 静电场的物理基础.....	3
§ 1-2 静电场的微分方程组.....	10
§ 1-3 不同介质分界面上静电场的边界条件.....	14
§ 1-4 泊松方程和拉普拉斯方程.....	17
§ 1-5 已知电荷分布求电位——场源问题.....	19
§ 1-6 已知边界情况求电位——边值问题.....	22
*§ 1-7 用分离变量法解边值问题.....	28
*§ 1-8 图解法的概念.....	37
*§ 1-9 用差分法解边值问题.....	40
§ 1-10 静电场的唯一性定理	49
§ 1-11 镜像法	53
§ 1-12 双导线输电线的电场	58
§ 1-13 电容及其计算	61
§ 1-14 多导体带电系统·部分电容	64
§ 1-15 静电屏蔽的概念	71
§ 1-16 电场能量和能量密度	72
§ 1-17 带电导体在静电场中受到的力	74
本章小结	78
习题	80
第二章 恒定电场	88
§ 2-1 载流回路周围介质中的电场.....	88
§ 2-2 导电媒质内的电场和电流场.....	89
§ 2-3 电阻的计算.....	93
§ 2-4 接地电阻及其计算.....	96

§ 2-5 静电模拟法	99
本章小结	101
习题	102
第三章 恒定磁场	104
§ 3-1 磁场的物理基础	104
§ 3-2 磁场的微分方程组和边界条件	110
§ 3-3 标量磁位	116
§ 3-4 磁屏蔽的概念	122
§ 3-5 矢量磁位及其计算	124
§ 3-6 磁场中的镜像法	131
§ 3-7 双导线输电线的磁场	134
§ 3-8 电感及其计算	136
§ 3-9 利用矢量磁位计算电感·诺曼公式	140
§ 3-10 磁场能量和能量密度	142
§ 3-11 载流导体在磁场中受到的力	146
本章小结	149
习题	152
第四章 时变电磁场	157
§ 4-1 时变电磁场的物理基础	157
§ 4-2 麦克斯韦微分方程组	161
§ 4-3 电磁场的边界条件	164
§ 4-4 理想介质中的均匀平面波	165
*§ 4-5 平面电磁波的反射和折射	174
§ 4-6 导电媒质中的电磁场	177
§ 4-7 电磁场的能量和能量传播·坡印廷矢量	185
§ 4-8 集肤效应	190
*§ 4-9 变压器铁心叠片中的电磁场·涡流	193
§ 4-10 邻近效应和电磁屏蔽的概念	198
§ 4-11 时变电磁场的动态位	199
§ 4-12 振荡电偶极子场的分析	204
*§ 4-13 电磁场和电路	209
本章小结	213

习题	218
习题答案	221
附录一 立体角的概念	228
附录二 矢量分析概要	229
1. 梯度	229
2. 散度	230
3. 高斯散度定理	231
4. 旋度	232
5. 斯托克斯定理	233
6. 纳布拉算子 ∇	234
7. 常用矢量分析公式	234
8. 梯度、散度、旋度和拉普拉斯算符在柱坐标和球坐标系中的 表达式	235
附录三 传输线	237
1. 均匀传输线的微分方程	237
2. 均匀传输线的正弦稳态解	239
3. 均匀传输线的参数	242
4. 接有不同负载的无损耗传输线	244
5. 均匀传输线的等效二端口网络	249
附录四 常用电学和磁学的量和单位	251

引 言

在电路理论中,通过电流、电压等物理量,研究了发生在电路中的电磁现象,取得了很大的成功。通过电磁场理论的学习,将进一步研究各种宏观电磁现象和电磁过程的物理本质和基本规律,从而大大地促进人们对电磁现象的认识、掌握和应用。

在电荷周围的空间,存在有电场。电场的性质可以通过电场强度等物理量来描述。在电流周围的空间,存在有磁场,磁场的性质可以通过磁感应强度等物理量来描述。电场强度、磁感应强度等物理量有些什么特征,它们在空间的分布与哪些因素有关,服从什么规律,它们相互之间的关系,以及如何对它们进行分析和计算,这便是电磁场理论所要阐述和研究的基本内容。

学习电磁场理论,可以加深对电路、磁路和其它电磁现象的理解,了解它们的适用范围和局限性。近代很多电工问题,如无线电波的发射和传播,高频淬火和加热,电子光学,高电压技术,集肤效应和电磁干扰及屏蔽的分析, R 、 L 、 C 元件参数的计算和设计,电机、电器电磁性能的分析 and 计算,传感及检测技术等等,都是和电磁场理论有关的。此外,学习场的分析方法,还可以培养科学的思维方法,开拓思路,提高科研工作的能力。因此,作为电专业的工程技术人员和科研人员,都有必要学习一定的电磁场基本理论。

本书在大学普通物理中电磁学的基础上展开讨论。为了便于学习,对有关物理内容作了简短复习。在第一、二、三章中,分别讨论了静电场、恒定电场、恒定磁场。在第四章中介绍了时变场,以建立电磁场的完整概念。应当指出,本书主要研究宏观电磁场理论,而不去研究原子、分子内部的电磁过程。此外,本书主要介绍分析工程电磁场问题所需要的基本概念和基本方法。这一方面和

理论物理电磁学及电动力学课程的侧重点是有所不同的。

在本书中,还要用到高等数学和工程数学中的一些有关知识,尤其是矢量分析和场论,更是研究电磁场理论的有力数学工具。为了便于查考,把有关的主要公式和结论列在附录二中。详细内容请读者参阅有关专著。

由于电磁场的概念与在生活中直接体验所获得的机械运动的概念,以及在电路中所遇到的概念相比较,有其本身的特点,所以初学时往往觉得抽象。但是只要认真思考,刻苦钻研,多加分析和对比,注意掌握矛盾的特性和共性,就能逐渐地熟悉和掌握它们。入门既不难,深造也是办得到的。

第一章 静 电 场

如果相对于观察者静止的带电体的电量不随时间变化,那么,在这个带电体的周围,便存在不随时间变化的静电场。静电场是电磁场的一种特殊情况。许多实际的电工问题,如电器的绝缘问题,带电质点在电子管电极间的受力问题,电容的计算等等,都是静电场应用的例子。静电分离、静电涂层、静电复印和印刷等工业应用也得到愈来愈广阔的发展。在某些场合,静电会带来危害,需要研究有效的防护措施^①。此外,研究静电场对于建立场的基本概念,为研究一般电磁场问题打下基础,也是完全必要的。

§ 1-1 静电场的物理基础

静电场的实验基础是库伦定律,可以用下式表示:

$$F = \frac{q_1 q_2 e_r}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1-1)$$

式中, q_1, q_2 分别表示两点电荷的电量, 在国际单位制 (SI) 中^②, 电量的单位是库仑 (C); $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$, 为真空的介电常数; r 为两点电荷间的距离, 单位为米 (m), e_r 是 r 方向的单位矢量。力 F 的单位是牛顿 (N)。

点电荷 q_1, q_2 相互间感受到力的作用, 是由于在 q_1, q_2 周围空间存在着电场。 q_1 的电场作用在 q_2 上使 q_2 感受到力, 而 q_2 的电场则作用在 q_1 上使 q_1 感受到力。电场是一种特殊形式的物质, 能使场内的电荷感受到力的作用。

① 参考周省三等编《电磁场的应用》第一章, 高等教育出版社, 1991 年 10 月。

② 本书一律采用国际单位制。

电场的分布特性可以通过单位正点电荷在场中所受的力来表征。描述电场性质的这个物理量称为电场强度 $\mathbf{E}$ ，它的数学表达式为

$$\mathbf{E} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{F}}{\Delta q} \quad (1-2)$$

式中 $\Delta \mathbf{F}$ 是受试电荷 Δq 在场中所受的力。 $\mathbf{E}$ 是随着空间位置不同而变化的矢量函数。在国际单位制中，它的单位是伏[特]每米 (V/m)。

由 (1-1)、(1-2) 式可知，点电荷 q 产生的电场强度可由下式计算：

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-3)$$

对于多个点电荷产生的电场，可以分别计算每一个点电荷的电场，然后叠加起来。一般而言，对于任意已知分布电荷的电场，也可由 (1-3) 式求得。如图 1-1， ρ 为 V 中的分布电荷体密度，将 V 分成很多小体积元 dV ，则 ρdV 可以看做一个点电荷，它在 A 点产生的相应的电场为 $\frac{\rho dV}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r$ ，则 A 点的总电场可通过积分求得如下：

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \int_V \frac{\rho(x', y', z') dV}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r \quad (1-4)$$

式中， x, y, z 为场点 A 所在点坐标，而 x', y', z' 为场源 ρ 所在点坐标。

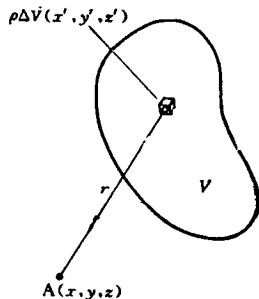


图 1-1

但是，按 (1-4) 式进行积分，一般比较复杂。因此，需要进一步研究静电场的性质，它们可以归纳为静电场的高斯定理和静电场的守恒性。

穿过电场中一个给定面积的电场强度的面积分，叫做通过该

面积的电场强度通量,可用下式表示:

$$\Psi_E = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-5)$$

静电场的高斯定理说明: 真空中通过任意闭合曲面 S 发出的电场强度通量, 等于 S 面内电荷的代数和与 ϵ_0 之比。 它的数学表达式为

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1-6)$$

高斯定理反映了静电场的一条基本性质。在某些对称情况下(例如球对称、柱对称),也可用它来直接求解电场。

例 1-1 设有电荷均匀分布的圆球, 球半径为 a , 电荷体密度为 ρ , 求球内和球外两区域中的电场强度。

解 根据球对称的特点, 以球心为原点, 以 r 为半径作一球面, 对此球面应用高斯定理, 并考虑到在此球面上 $\mathbf{E}$ 的数值相同, 方向与外法线 $\mathbf{e}_n$ 一致, 由(1-6)式, 有

$$r \geq a \quad 4\pi r^2 E = \frac{1}{\epsilon_0} q, \quad E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{e}_r, \quad \text{其中 } q = \frac{4\pi}{3} a^3 \rho$$

$$r \leq a \quad 4\pi r^2 E = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho, \quad E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\rho r}{3\epsilon_0} \mathbf{e}_r$$

静电场的另一条基本性质为静电场的守恒性。它说明: 在静电场中沿任意闭合途径, 电场强度的线积分恒等于零。 它的数学表达式为

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-7)$$

根据静电场的守恒性可以说明:

(1) 电力线不能闭合。 如果电力线闭合, 则沿此闭合途径的

电场强度线积分便不能为零。

(2) 可以引用电位函数来研究静电场。

任意两点间电场强度的线积分只与该两点的位置有关。如果固定其中的一点 B, 则积分值只与 A 点的位置有关, 称为 A 点的电位(图 1-2), 记作

$$\varphi(x, y, z) = \int_{A(x, y, z)}^{B(x_0, y_0, z_0)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1-8)$$

它等于单位正电荷在电场作用下, 由 A 点移到 B 点时, 电场所作的功。在国际单位制中, 电位的单位是伏特(V)。B 点称为参考点(参考点的电位为零)。参考点可以任意选取。

当选取的参考点不同时, A 点的电位值可以相差一常数。当电荷分布在有限区域内时, 通常选取无限远处作为参考点, 则 $\frac{1}{r_B} \rightarrow 0$, 便得到点电荷以无限远处为参考点时的电位表达式为

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1-9)$$

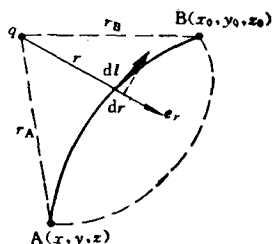


图 1-2

前面讨论的是真空中电荷的电场。实际的电场分布还与空间存在的导体和介质情况有关。导体在电场作用下产生的静电感应现象, 介质在电场作用下产生的极化现象, 都会影响空间的电场分布。

首先考虑导体的影响。导体的特点是其中有大量的自由电子。当将导体引入电场以后, 在电场的作用下, 便有电荷运动, 原来的静电平衡状态就被破坏了。由于电场和电荷相互作用, 使电荷重新分布, 这些电荷称为感应电荷, 它们将形成附加的电场。在导体内部附加电场的方向是与原来电场的方向相反的。直至导体内附加电场与原来的电场完全抵消, 使总电场为零时, 才又达到新

的静电平衡状态。这时,导体内的电场为零,导体内任意点的电位都相同,整个导体是等位体。又由高斯定理可知,导体内的电荷为零,故电荷都分布在导体的表面。在导体表面曲率较大的地方,电荷密度也较大。综上所述,静电场中导体的特点是:在导体表面上形成了感应电荷,它使导体内的电场为零,导体为等位体,并使导体外的电场发生变化。这就是物理学中已经阐述过的静电感应现象。

图 1-3 是说明静电感应现象的示意图。图(a)是原外加电场;图(b)为引入导体后因静电感应引起的感应电荷分布及其形成的附加电场;图(c)为引入导体后的总电场。

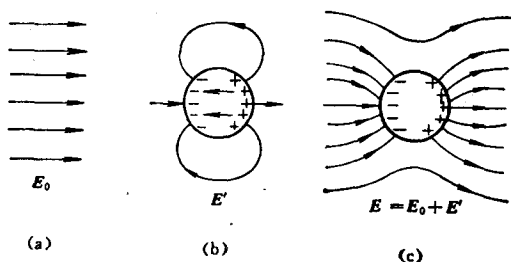


图 1-3

其次,考虑介质的影响。介质的特点是其中的电子被原子核所束缚而不能自由运动。但在电场的作用下,介质中的正、负电荷的作用中心能拉开一个很小的距离,形成一个个小的电偶极子,如图 1-4 所示^①。这种作用称为介质的极化。这类电荷称为束缚电荷或极化电荷。这些偶极子或束缚电荷形成附加电场,从而引起原来电场分布的变化。电介质所能经受的最大电场强度称为“击穿场强”。超过这一限度,介质就要被击穿。

设每个介质分子形成的束缚电荷为 $\pm q'$, 相对移动的距离为

^① 这是对无极分子而言。对有极分子则是使电偶极矩转向电场方向。

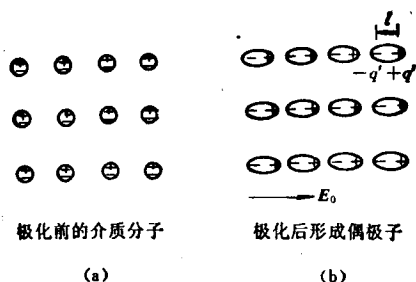


图 1-4

l , 则形成的电偶极子的作用与 $p = q'l$ 有关。 p 称为电偶极矩, 单位为库仑·米 ($C \cdot m$), 方向为由负电荷指向正电荷。为了表征介质极化的程度, 引入电极化强度 P , 它等于单位体积内的分子电偶极矩的矢量和, 即

$$P = \frac{\sum p_k}{\Delta V} = Np \quad (1-10)$$

或微小体积 ΔV 内电偶极矩矢量和 $\sum p_k$ 与 ΔV 的比值, 当 ΔV 趋于零时的极限值:

$$P = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum p_k}{\Delta V}$$

式中, p_k 为第 k 个分子的电偶极矩, $\sum p_k$ 为 ΔV 内各分子电偶极矩的矢量和, N 为单位体积内的分子数, p 为 ΔV 内的平均电偶极矩。 P 的单位是库仑每平方米 (C/m^2)。

对于线性各向同性介质, 电极化强度和电场强度成正比, 故有

$$P = \chi E \quad (1-11)$$

χ 称为介质的电极化率。对于非线性介质, χ 的值与电场强度的大小有关; 对于各向异性介质, P 和 E 的方向不一致, 并且 P 的大小和方向与 E 的方向有关。它们间的关系要用矩阵来表示。本书只讨论线性各向同性介质。

最后讨论一下空间存在导体和介质时, 静电场基本性质的表

达形式。导体对电场的影响,也就是导体表面上感应电荷的影响。它们并不影响静电场的守恒性和高斯定理的表达形式。介质对电场的影响,可归结为束缚电荷的作用。这时认为媒质均匀且为 ϵ_0 , 而束缚电荷为附加场源。静电场的守恒性仍然成立。对高斯定理而言,考虑束缚电荷影响后应为

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q + Q'}{\epsilon_0} \quad (1-12)$$

式中 Q' 是 S 面内所包含的总束缚电荷。 Q' 的大小和 $\mathbf{P}$ 有关,可以证明, $Q' = -\oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S}$ 。

* 为了计算 Q' , 先计算在极化过程中通过面元 $d\mathbf{S}$ 穿出 S 面的束缚电荷量。设在极化时正电荷沿电场方向移动的距离为 d , 负电荷反向位移的距离为 $l-d$, 通过 $d\mathbf{S}$ 作一小斜柱体如图 1-5(a) 所示。图 1-5(b) 是这个柱体部分的放大的截面图。在极化的

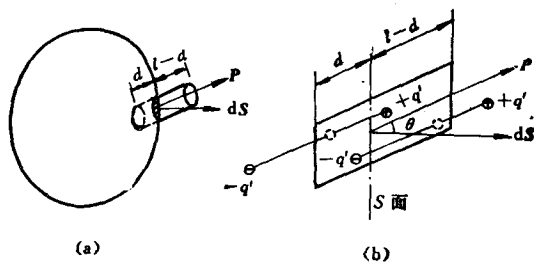


图 1-5

过程中,面内柱体 dV_i 中的正束缚电荷将穿出 $d\mathbf{S}$ 面;而面外柱体 dV_e 内的负束缚电荷则穿入 $d\mathbf{S}$ 面。后者相当于同样多的正电荷穿出 $d\mathbf{S}$ 面。所以极化过程中穿出 $d\mathbf{S}$ 面的总束缚电荷为

$$\begin{aligned} dQ' &= q'NdV_i + q'NdV_e = q'NdV = q'Ndsl \cos \theta \\ &= NpdS \cos \theta = P dS \cos \theta = \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S} \end{aligned}$$

穿出 S 面的总束缚电荷为上式的积分 $\oint_S \mathbf{P} \cdot d\mathbf{S}$, 而留在 S 面内